

Drehstromantriebe mit makroelektronischer Versorgung und mikroelektronischer Regelung: universelle elektromechanische Energiequellen

Leonhard, Werner

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 46, 1995,
S.113-126



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Drehstromantriebe mit makroelektronischer Versorgung und mikroelektronischer Regelung: universelle elektromechanische Energiequellen*

Von **Werner Leonhard****, Braunschweig

(Eingegangen am 8.12.1995)

Energie, eine Grundlage unseres Lebens

Energie und Kommunikation sind tragende Säulen unseres Lebens, an deren Gründung und Errichtung die Elektrotechnik entscheidend beteiligt ist. Es hat heute den Anschein, als fände der Fortschritt vorwiegend bei Kommunikation und Computern statt, während in der Energietechnik alles Wesentliche getan ist und eigentlich nur noch bleibt, das lästige Problem mit der Kernenergie aus der Welt zu schaffen; der Gedanke liegt nahe, da uns heute PCs und Mobiltelefone auf Schritt und Tritt begegnen und jeden Kommunikationswilligen unmittelbar ansprechen. Hier soll versucht werden zu zeigen, daß diese verbreitete Ansicht in Wirklichkeit auf einer Verengung des Blicks beruht; auch in der Energietechnik sind dramatische Entwicklungen im Gange, nur spielen sie sich – schon aus Gründen der elektrischen Sicherheit – in verschlossenen Schaltschränken ab, in Fabriken oder im Maschinenraum von Lokomotiven, aber auch dezentral in vielen Haushaltsgeräten, ohne daß der Anwender dies unmittelbar wahrnimmt.

Über die Bedeutung der Energie für unsere Existenz wurde schon viel gesagt und dem ist wenig hinzuzufügen; stellen wir uns nur einmal vor, wie unsere Vorfahren noch vor hundertfünfzig Jahren gelebt haben. Sofern sie nicht zu einer kleinen begüterten Schicht mit ererbtem Reichtum, Land und genügend Diensthofen oder gar Einfluß bei Hofe gehörten, bedeutete das Leben für sie harte Arbeit auf dem Feld, vielleicht beim Bau von Eisenbahnen, in Werkstätten oder Bergwerken, zehn Stunden am Tag und sechs Tage in der Woche. Körperliche Gebrechen durch das Leben in schlecht geheizten Wohnungen, Überarbeitung und Verschleiß waren an der Tagesordnung; Mobilität und medizinische Versorgung bedeuteten Luxus, allgemeiner Wohlstand oder sozialer Fortschritt waren undenkbar; manche von uns wären womöglich Revolutionäre geworden. Als dann Mechanisierung und Industrialisierung einzogen, hat man die Technik vor allem als Befreiung und humanitären Fortschritt gepriesen.

Heute haben wir dies alles fast vergessen; zwar schätzen wir sportliche Betätigung, aber nur soweit sie freiwillig erfolgt und Freude bereitet (manche, die im Hochgebirge mit dem Mountainbike auf den Schultern dem Gipfelkreuz zustreben, schießen auch dabei über das sinnvolle Maß hinaus). Im übrigen haben wir uns daran gewöhnt, steigende

* Überarbeiteter Vortrag an der Universität Stuttgart am 13.10.1995

** Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. W. Leonhard · Institut für Regelungstechnik

TU Braunschweig · 38106 Braunschweig

Mengen externer Energie zu verbrauchen; wir sind energiesüchtig geworden, um das Leben noch bequemer und angenehmer zu machen und um Zeit zu haben für andere Dinge, die aufgeklärten Menschen angemessener erscheinen. Gleichzeitig haben wir aber den Blick für Zusammenhänge verloren; solange wir die Kohlen aus dem Keller holen mußten, bestand wenigstens noch eine lockere Vorstellung vom Wert der Energie, heute kann man gleichzeitig herkömmliche Kraftwerke kritisieren (wegen des Kohlendi-oxys), die Kernkraft verdammen (wegen der atomaren Gefahr), sogar Wasserkraftwerke wegen der Schäden für die Natur ablehnen und dennoch unbeschwert Unmengen von Strom konsumieren.

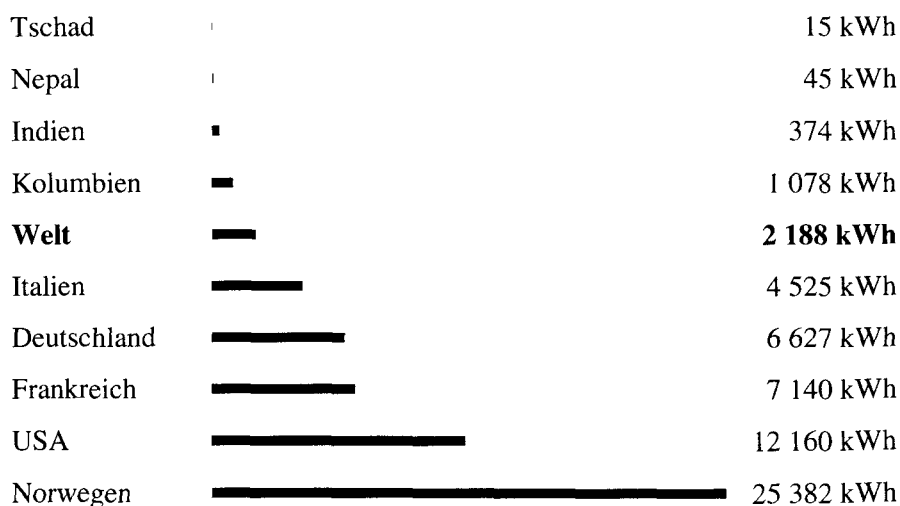


Abb. 1:

*Pro-Kopf Jahresverbrauch an elektrischer Energie in verschiedenen Ländern
(Quelle VDEW, FAZ)*

Der Pro-Kopf Verbrauch an Energie ist zu einem Indikator des Wohlstandes und der industriellen Entwicklung eines Landes geworden, ebenso wie die Zahl der Autos oder Telephone. Wenn wir uns auf die elektrische Energieform beschränken, die wegen der Vielseitigkeit bei der Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Anwendung besondere Vorzüge hat, ergibt sich der in Bild 1 dargestellte Jahresvergleich; er zeigt gewaltige regionale Unterschiede, wobei Norwegen mit fast unbegrenzten Wasserkraften und einer geringen Bevölkerungszahl sicher einen Sonderfall darstellt.

Natürlich streben aber auch die Menschen in der dritten Welt nach einem besseren Leben mit mehr Energieeinsatz, wie es ihnen im westlichen Fernsehen vorgeführt wird, ein verständlicher Wunsch. Wie er allerdings gestillt werden soll, kann heute niemand sagen. Kürzlich haben Umweltexperten in Westeuropa und Amerika über die Weltbank das Projekt eines Wasserkraftwerkes in Nepal mit der Begründung zu Fall gebracht, daß es die Natur zerstöre, aus dem Munde von Energieverschwendern ein seltsamer Einwand; um die Probleme der künftigen Energieversorgung der dritten Welt vernünftig zu

diskutieren, wird man überzeugender argumentieren müssen. Hier hilft auch der Hinweis auf Wind- und Sonnenenergie nicht, die den künftigen Energiebedarf nicht annähernd decken können. Die aus Wind erzeugte elektrische Energie liegt bei uns noch im Promillebereich, und schon gibt es in den „Windregionen“ Widerstände des Naturschutzes.

Geregelte elektromechanische Energiewandler

Die Hälfte der in einem Industrieland gewonnenen elektrischen Energie wird von elektrischen Antrieben aufgenommen, um sie in mechanische Arbeit umzuwandeln. Die Industrie verwendet davon die Hälfte für Produktions-, Umform- und Transportvorgänge aller Art, ein kleiner Teil dient dem Schienenverkehr und ein Viertel wird inzwischen von Haushalten genutzt, um die unentbehrlichen mechanischen Helfer mit Energie zu versorgen, von den im Heizungskeller verborgenen Öl- und Umwälzpumpen, dem Kompressor im Kühlschrank, dem Antrieb für das Garagentor bis zur Waschmaschine und zum Videorecorder.

Die meisten Arbeitsmaschinen arbeiten zeitweilig mit etwa gleichbleibender Drehzahl, nur bei einem kleineren Teil muß der Antrieb durch eine Regelung an den Bedarf der mechanischen Last angepaßt werden, etwa bei einem Aufzug, einer Werkzeugmaschine oder der Straßenbahn; wegen der fortschreitenden Automatisierung wird dieser Anteil zunehmen; außerdem läßt sich damit Energie einsparen, denn die von Regelantrieben aufgenommene elektrische Leistung orientiert sich wegen des guten Umsetzungswirkungsgrades an der abgegebenen mechanischen Leistung. Beispiele sind große Verdichterantriebe in der Verfahrenstechnik oder bei Ferngasleitungen.

Elektrische Regelantriebe sind das eigentliche Thema dieses Beitrages; hier sind seit etwa 20 Jahren regelrechte Umwälzungen im Gange, nachdem hundert Jahre lang die Gleichstrommaschine dominiert hatte und es fraglich war, ob überhaupt noch ein nennenswerter Entwicklungsbedarf bestünde; Bild 2 zeigt das Prinzip eines solchen Antriebs. Wir erkennen, daß die Gleichstrommaschine eigentlich eine Wechselstromma-

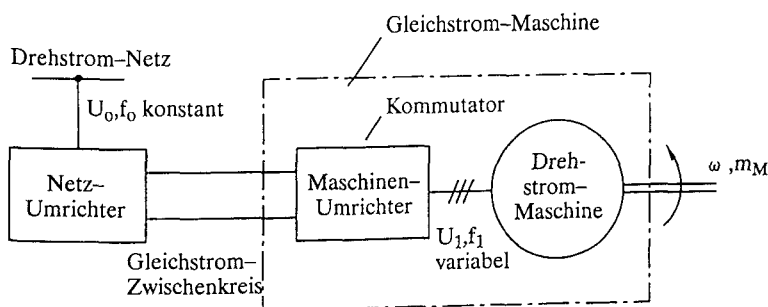


Abb. 2:
Gleichstrom- und Drehstrom-Regelantrieb

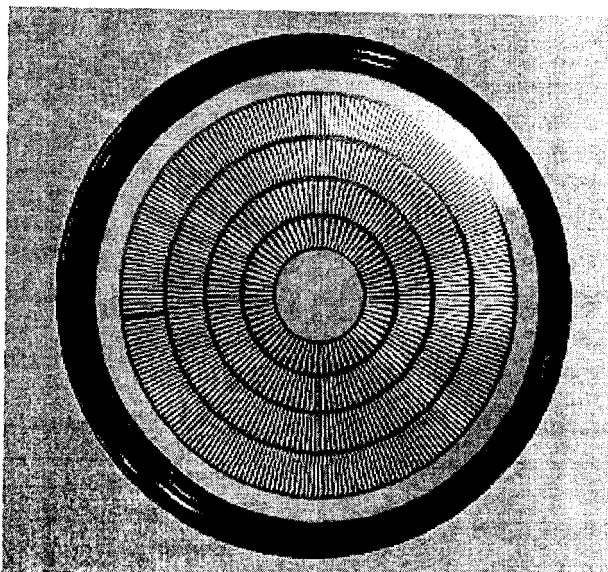
schine ist, wo der im rotierenden Anker- wegen der periodisch verteilten magnetischen Felder in der Maschine – erforderliche drehzahlfrequente Wechselstrom durch einen maschineninternen mechanischen Polwender, den Kommutator, aus Gleichstrom gebildet wird. Diese mechanische Wechselrichtung kennzeichnet die Eleganz des Prinzips, gleichzeitig aber auch seine Schwäche, da die bewegten elektrischen Kontakte die Drehzahl und Leistung praktisch ausführbarer Maschinen begrenzen, auch werden Baulänge, Trägheitsmoment und Gewicht durch den Kommutator vergrößert. Schließlich ist auch eine regelmäßige Wartung erforderlich und wegen der möglichen Funkenbildung ist der Einsatz z.B. bei explosiblen Umgebungsbedingungen nur mit Einschränkungen möglich. Seit Jahrzehnten hat man sich ohne besonderen Erfolg um einen Ersatz des Kommutators durch außerhalb der Maschine befindliche ruhende Wechselrichter bemüht, aber erst die Entwicklung der Halbleitertechnik hat brauchbare und freizügig einsetzbare technische Lösungen ohne bewegte elektrische Kontakte möglich gemacht. Das Ergebnis sind die heutigen Drehstrom- Regelantriebe, bei denen die genannten Beschränkungen entfallen.

Leistungselektronik und Mikroelektronik

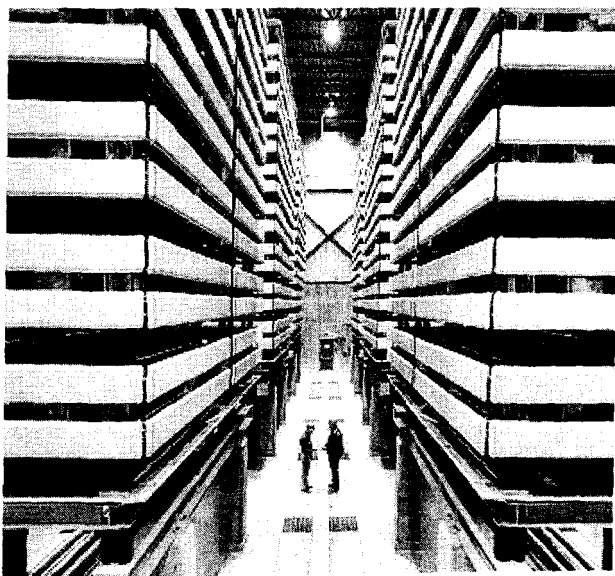
Kern dieser Entwicklung sind elektronische Schalter hoher Leistung, inzwischen bis zu Tausenden von Volt und Ampere in einer einzigen Einheit, deren aktiver Teil aus einer nur millimeterdicken Halbleiterscheibe aus einkristallinem und mit anderen Atomen dotiertem Silizium besteht. Der elektrische Widerstand solcher Festkörper-Bauelemente läßt sich mit schwachen elektrischen oder optischen Signalen im Bereich von 9 Größenordnungen steuern, es handelt sich also um fast ideale elektronische Schalter; Bild 3a zeigt ein Beispiel. Die Schaltfunktion ist bei großen elektrischen Leistungen zwingend notwendig, andernfalls würden prohibitive Leistungsverluste entstehen. Die elektronischen Schalter arbeiten ruhend, alles was sich bewegt, sind die Elektronen im Halbleiter.

Mit diesen Schaltelementen lassen sich Umrichter bauen, um aus den Netzspannungen fester Frequenz die zur Speisung elektrischer Maschinen benötigten frequenzvariablen Spannungen und Ströme zu erzeugen. Die unvermeidlichen Leistungsverluste äußern sich in Form von Wärme, die durch intensive Kühlung der Schaltelemente abzuführen ist. Auch größte Leistungen, etwa wie man sie in der Energieversorgung zur Kopplung verschiedenfrequenter Netze oder zur Energieübertragung mit Seekabeln benötigt, lassen sich so elektronisch umformen, wie in Bild 3b gezeigt ist.

Da die Schaltelemente, gemessen am Leistungsumsatz, sehr klein sind und geringe thermische Speicherfähigkeit aufweisen, ist ein wirksamer und schneller Schutz unerläßlich, um Überlastung und Zerstörung durch Übertemperatur zu verhindern; am besten geschieht dies durch eine Regelung zur Begrenzung der Ströme und Spannungen. Bei der Speisung elektrischer Maschinen, wo durch die elektromechanische Energieumwandlung widerstandsfreie Gegenspannungen induziert werden, ist das besonders wichtig; fehlerhafte Steuersignale können Kurzschlußströme vom Mehrfachen des thermisch zulässigen Wertes verursachen. Umrichter sind außerdem sehr trägheitsarme



*Abb. 3a:
Leistungselektronik
Elektronischer Schalter (GTO-Thyristor), 4500 V, 3000 A
für Drehstromantrieb des ICE*



*Abb. 3b:
600 MW-Umrichter zur Kopplung verschiedenfrequenter Drehstromnetze,
enthält etwa 1000 optisch gesteuerte elektronische Schalter (Thyristoren)*

Stellglieder, die in Millisekunden (10^{-3} s) reagieren, weshalb ohne Schutzmaßnahmen ein sicherer Betrieb nicht möglich wäre. Andererseits haben sie mit einer richtig eingestellten Regelung nahezu ideale Eigenschaften, etwa eine enorme Leistungsverstärkung ($\text{mW} \Rightarrow \text{MW}$, 10^9), gute Linearität und einen Regel-Frequenzbereich von 100 bis 1000 Hz, was sie für die Entkopplung dynamischer Systeme hervorragend geeignet macht.

Drehstrom- Regelantriebe, ein interdisziplinäres Arbeitsgebiet

Die Regelaufgaben bei Antrieben mit leistungselektronischen Umrichtern sind wegen der komplizierten inneren Struktur von Drehstrommaschinen und der starken nicht-linearen Kopplungen nur digital und unter Verwendung mikroelektronischer Komponenten lösbar, etwa Mikrorechnern oder speziellen integrierten Schaltungen; nur sie bieten die erforderliche Flexibilität der Signalverarbeitung bei vertretbaren Kosten. Daraus resultiert eine enge Verbindung zwischen den Extremen der Halbleitertechnik, auf der einen Seite die Leistungselektronik mit makroelektronischen Schaltern und auf der anderen die Mikroelektronik mit immer schneller werdenden integrierten Schaltungen und Prozessoren. Während das vorher beschriebene Bauelement einen einzelnen elektronischen Schalter hoher Leistung darstellt, besteht ein heutiger Mikrorechner-Chip aus Hunderttausenden oder Millionen von einzelnen Schaltern in einem briefmarkengroßen Siliziumkristall, die programmgesteuert in der Sekunde viele Millionen von Gleitkomma-Rechenoperationen (MFLOP/s) ausführen können. Wegen der hohen Packungsdichte und der unvermeidlichen Leistungsverluste ist auch hier nur ein Schaltbetrieb praktikabel.

Wenn man fragt, weshalb ausgerechnet bei elektrischen Antrieben eine so große Signalverarbeitungskapazität nötig sein soll, ist die einfache Antwort, daß 10 MFLOP/Sekunde eben nur 10 kFLOP/Millisekunde bedeuten und bei der Regelung von schnell reagierenden Stellantrieben in Werkzeugmaschinen oder Robotern eine Millisekunde einen typischen Wert der Zugriffszeit auf wichtige Größen darstellt. Erst durch Kombination makroelektronischer Bauteile hoher Schaltleistung mit mikroelektronischen Komponenten hoher Signalverarbeitungsgeschwindigkeit sind die Fortschritte in der elektrischen Energietechnik denkbar geworden. Eine Assoziation mit der Funktion von Muskeln und Nerven in einem Organismus liegt natürlich nahe.

Die Arbeit mit Echtzeitprogrammen zur Steuerung zeitkritischer technischer Prozesse bedeutet übrigens für engagierte Studenten einen besonderen Reiz, da es bei Programmfehlern auch zu ernsteren Folgen als falsch bedrucktem Papier, etwa Kurzschlüssen oder kostspieligen Schäden, kommen kann.

Wegen des weiten Spektrums überlappender Forschungs- und Entwicklungsaufgaben war eine Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen in Industrie und Hochschulen unumgänglich, wie in Bild 4 angedeutet ist. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat dem durch mehrere sog. Schwerpunktprogramme Rechnung getragen, an denen etwa zehn Hochschulinstiute beteiligt waren; in den letzten 20 Jahren hat das in Deutschland zu etwa 120 mehrjährigen Projekten mit abschließenden Promotionen geführt. Alle diese

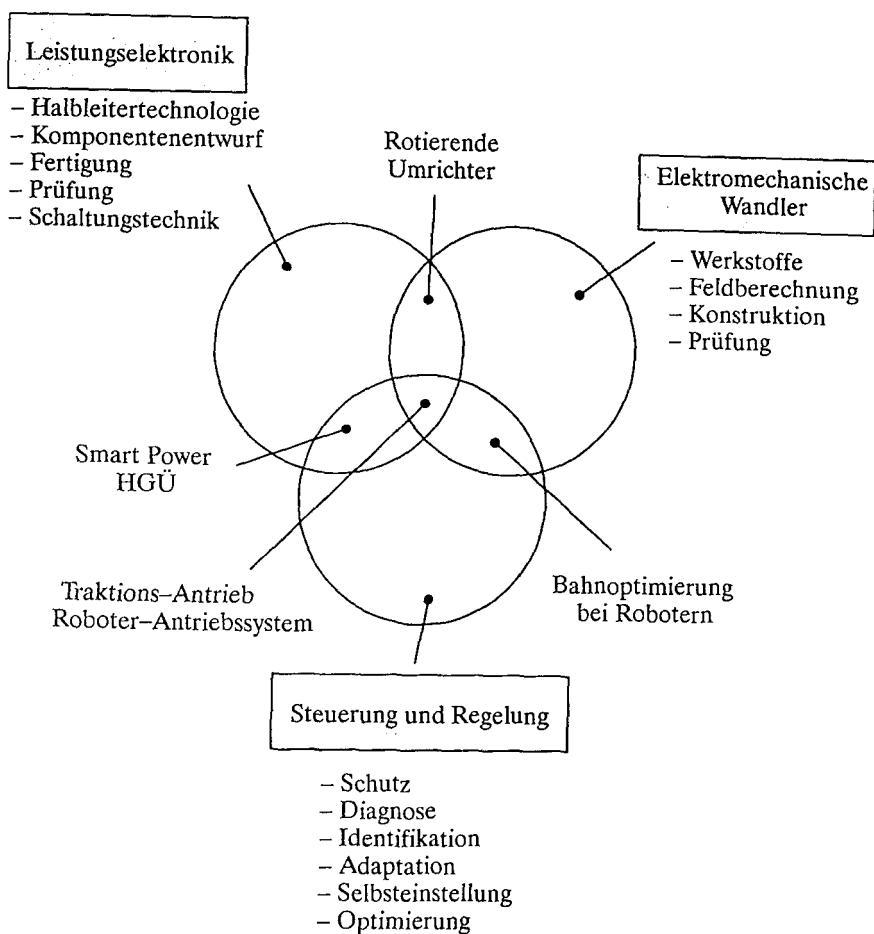


Abb. 4:

Elektromechanische Energiewandlung, Forschungsk Kooperation von Hochschulen und Industrie

hochmotivierten jungen Ingenieure haben anschließend in der Industrie weitergearbeitet und zum heutigen hohen Stand der Drehstrom- Antriebstechnik in Europa beigetragen; einige sind inzwischen als Professoren an Hochschulen zurückgekehrt. Zweifellos hat dieser Austausch von Ideen, der auch in anderen europäischen Ländern stattfand, dazu beigetragen, daß die europäische Industrie auf diesem Gebiet heute eine Spitzenstellung beanspruchen kann. Es gibt also glücklicherweise noch HiTech-Aktivitäten, wo Europa keinen Vergleich zu scheuen braucht. Etwa die Hälfte des Weltmarktes an elektrischen Regelantrieben befindet sich in Europa.

Vielfalt von Drehstrom- Regelantrieben

Eine Besonderheit von Drehstrom-, verglichen mit Gleichstrom-Regelantrieben, ist ihre Vielfalt; in Bild 5 sind einige Formen von Drehstrommotoren fünf Grundtypen von Umrichtern gegenübergestellt, was insgesamt 25 mögliche Kombinationen ergibt. Sie umfassen, abgesehen von den hier nicht interessierenden elektrischen Uhrenantrieben (10^{-6} W), schnell reagierende Stellmotoren im kW-Bereich bis zu Großantrieben hoher Drehzahl und drehzahlvariablen Pumpspeicher-Kraftwerken (10^8 W), wo Gleichstrommaschinen aus physikalischen Gründen nicht gebaut werden konnten. Darunter sind auch langsamlaufende getriebelose Erzmühlen-Antriebe mit einem Drehmoment von 1000 mt, entsprechend dem Gewicht eines Kraftfahrzeugs an einem gedachten Hebelarm von 1 km Länge.

Nur die Felder mit Eintragungen sind heute von praktischer Bedeutung, wobei die besonderen Eigenschaften jeder Kombination für bestimmte Anwendungen von Interesse sind. Deshalb ist nicht damit zu rechnen, daß das Gebiet sich im Laufe der Zeit auf einige wenige Typen reduziert, im Gegenteil, es kann sich weiter auffächern, wenn neue Bauelemente oder Schaltungen hinzukommen, etwa feldeffekt-gesteuerte Thyristoren oder die viel diskutierten Resonanz-Umrichter.

Maschinen \ Umrichter	Umrichter mit Zwischenkreis				Direktumrichter
	Umrichter mit Spannungs-Zwischenkreis		Umrichter mit Stromzwischenkreis		
	Transistor-Wechselrichter (IGBT)	Thyristor-Wechselrichter (GTO)	Thyristor-Wechselrichter (GTO) mit Zwangskommutierung	Thyristor-Wechselrichter mit natürlicher oder Lastkommutierung	
Synchronmotor mit permanentmagnetischer Erregung	Niedrige Leistung (10 kW), sehr gutes dynamisches Verhalten (Servoantrieb)	Mittlere Leistung (1 MW), hohe Leistungsdichte			
Reluktanzmotor		Niedrige Leistung (100 kW)			
Asynchronmotor mit Käfigläufer	Niedrige bis mittlere Leistungen (500 kW) hohe Drehzahl, sehr gutes dynamisches Verhalten (Spindel- / Servoantrieb)	Mittlere bis hohe Leistung (2 MW) sehr gutes dynamisches Verhalten	Mittlere bis hohe Leistung (4 MW) hohe Drehzahl		Hohe Leistung (7,5 MW), niedrige Drehzahl, sehr gutes dynamisches Verhalten
Doppelt gespeister Asynchronmotor mit Schleifringläufer				Hohe Leistung (20 MW), untersynchroner Betrieb	Hohe Leistung (100 MW), begrenzter Drehzahlstellbereich
Synchronmotor mit Feld- und Dämpferwicklung				Hohe Leistung (40 MW), hohe Drehzahl	Hohe Leistung (10 MW), niedrige Drehzahl, sehr gutes dynamisches Verhalten

Abb. 5:

Verschiedene Arten von Drehstrom-Regelantrieben

Die Vielfalt praktisch verwirklichter Drehstrom-Regelantriebe erhöht sich dramatisch, wenn man auf einer dritten Achse die verschiedenen Regelverfahren hinzunimmt. Bei nur fünf angenommenen Grund-Regelverfahren wird aus der ebenen eine räumliche Anordnung mit 125 verschiedenen Arten von Drehstrom-Regelantrieben, eine verwirrende Vielfalt, die auch für Experten nur schwer im Detail zu überschauen ist. Sicher ist das einer der Gründe, weshalb sich an den Hochschulen immer neue Forscher diesem aktuellen internationalen Arbeitsgebiet zuwenden.

Der Wegfall des mechanischen Stromwenders hat nicht nur die schon genannten Vorzüge einer Maschine ohne bewegte Kontakte, er erlaubt auch eine bedeutende Erhöhung der Leistungsdichte. Bild 6 zeigt dies anhand von zwei Beispielen; es handelt sich dabei einmal um den Vergleich zweier Bahnmotoren (6a), wie sie in bisherigen Intercity-Lokomotiven und neuen Drehstrom-Lokomotiven zu finden sind und um Stellantriebe (6b) für Werkzeugmaschinen und Roboter, wo schnellste Reaktionsfähigkeit ge-

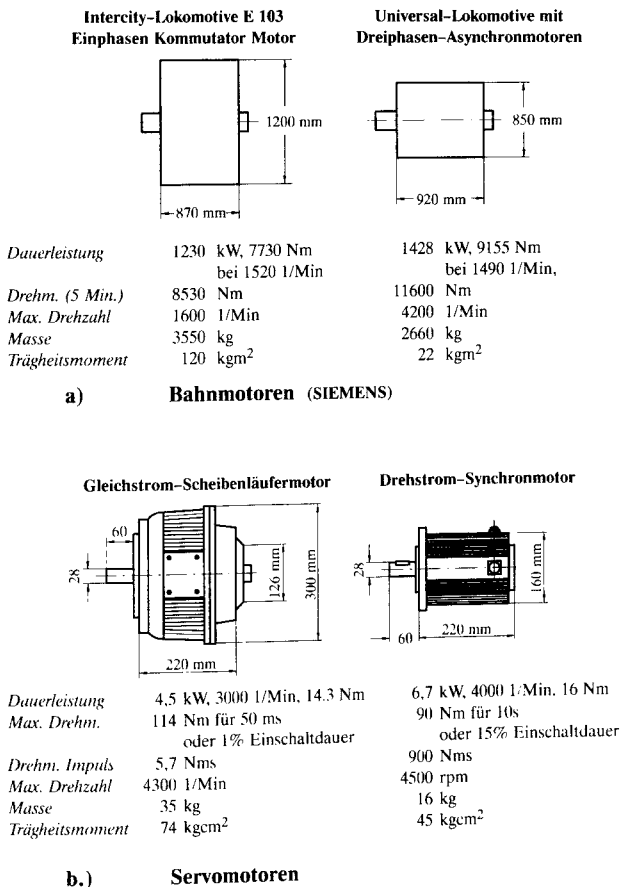


Abb. 6:

Zwei Beispiele praktisch ausgeführter Kommutatormotoren und entsprechender kommutatorloser Drehstrommotoren

fordert wird. Die Daten machen deutlich, daß die jeweils neuen Motoren den früheren in jeder Hinsicht überlegen sind, nicht nur in Abmessungen und Gewicht, sondern auch in der Überlastbarkeit und im reduzierten Trägheitsmoment, was sich vor allem auf die Dynamik des Regelantriebs auswirkt.

Bei Bahnantrieben hat dies zur Folge, daß die Lokomotive beim Anfahren und Bremsen den wechselnden Reibschluß zwischen Rad/Schiene besser ausnutzen kann (ähnlich ABS), so daß bei gleicher Achslast vier der neuen Motoren etwa die gleiche Zugkraft erbringen wie sechs Motoren in der um die Hälfte schwereren Intercity-Lokomotive. Bei den Stellantrieben sind vor allem die geringere Baugröße und der größere Momentimpuls wichtig, um die Motoren leichter in die mechanische Last, eine Werkzeugmaschine oder einen Roboter, integrieren zu können, wo jede Bewegungsachse ihren eigenen Antrieb besitzt.

Prinzip der Feldorientierung

Eine dynamisch hochwertige Regelung erfordert eine genaue mathematische Beschreibung des physikalischen Verhaltens der Regelstrecke. Solche Modelle sind für elektrische Drehfeldmaschinen in Form nichtlinearer vektorieller Differentialgleichungen seit längerem bekannt, doch war die regelungstechnische Disziplin trotz hochentwickelter analytischer Verfahren jahrzehntelang nicht in der Lage, daraus eine den Gleichstromantrieben entsprechende Lösung für die Regelung des Drehmomentes abzuleiten, der primären Steuergröße jeder mechanischer Drehbewegung. Es bedurfte hierzu einer grundlegenden neuen Idee, die Anfang der 70er Jahre von Blaschke formuliert wurde, des Prinzips der Feldorientierung. Es ist hier nicht der Platz, dies im einzelnen zu diskutieren, nur der Grundgedanke sei kurz erläutert.

Bild 7a, b zeigt schematisch den Querschnitt und die zugehörige Abwicklung einer Drehstrommaschine, wo die drei Ständerwicklungen symmetrisch im Stator verteilt sind und bei Speisung mit Strömen in axialen Leitern raumfeste Durchflutungswellen Θ_s erzeugen; mit zeitlich veränderlichen aber nicht notwendigerweise sinusförmigen Strö-

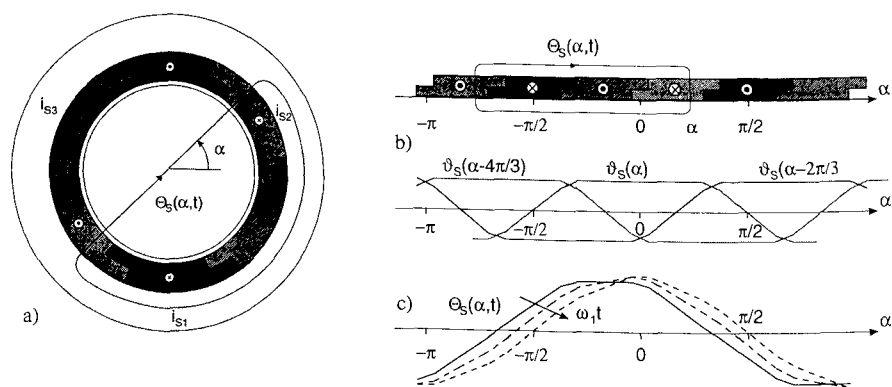


Abb. 7:
Durchflutung einer symmetrischen Drehstromwicklung

men bildet sich eine Wanderwelle $\Theta_S(\alpha, t)$ aus, die bei entsprechender Gestaltung der Wicklung eine angenähert sinusförmige Gestalt hat und sich bei Speisung mit Wechselströmen mit schwankender Winkelgeschwindigkeit $\omega_1(t)$ bewegt, wie in Bild 7c angedeutet ist.

Eine zweite Wanderwelle, ebenfalls angenähert sinusförmig verteilt, beschreibt die radialgerichtete Induktionsverteilung im Luftspalt, $B_R(\alpha, t)$, die bei einer permanentenregten Maschine von den rotorfesten Magneten, bei einer Maschine mit Läuferwicklungen aber von den Stator- und Rotorströmen erzeugt sein kann und mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega_{mR}(t)$ umläuft; dies ist in Bild 8 angedeutet.

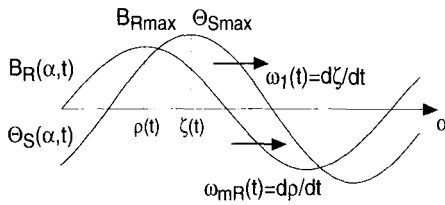


Abb. 8:

Fluß- und Durchflutungswelle im Luftspalt einer symmetrischen Drehstrommaschine

Die Bildung der tangentialen Umfangskraft erfolgt nach der Dreifingerregel, indem an jeder Stelle die axiale Durchflutung mit der radialen Induktion zu multiplizieren und das Ergebnis über den Umfang zu integrieren ist. Daraus folgt das einfache Ergebnis, daß, um ein vorgegebenes gleichbleibendes Drehmoment zu erzeugen, beide Wanderwellen synchron umlaufen müssen; die von den Ständerströmen gebildete Durchflutungswelle ist also an der Flußwelle zu orientieren. Man kann den Sachverhalt auch so ausdrücken, daß die vom ruhenden Umrichter erzeugten Ständerströme in einem von der Flußwelle bestimmten bewegten Koordinatensystem zu regeln sind, d.h. es sind Koordinaten-Transformationen erforderlich. Im nachhinein war für alle verblüffend, daß es so lange gedauert hat, dieses einfache Prinzip zu finden.

Allerdings sind die verschiedenen Größen, insbesondere Ort und Amplitude der Flußwelle, und die flußbezogenen Stromkomponenten einer unmittelbaren Messung nicht zugänglich; sie sind vielmehr aus den meßbaren Klemmenspannungen und Strömen sowie aus der Kenntnis von Parametern des Maschinenmodells zu schätzen, was einen erheblichen Aufwand an Echtzeit-Signalverarbeitung und numerischer Mathematik erfordert; z.B. sind für die Transformationen trigonometrische Funktionen unbegrenzt zunehmender Winkel zu bilden, was mit analogen Mitteln auch heute nicht praktikabel wäre. Die allgemeine Anwendung der neuen Ideen mußte deshalb warten, bis leistungsfähige und preiswerte Mikrorechner für eine digitale Lösung zur Verfügung standen; nachdem es dann Ende der 70er Jahre soweit war, gab es kein Halten mehr, die Nachricht von den neuen vektoriellen Regelverfahren bei Drehstrommaschinen verbreitete sich mit Windeseile von Europa aus über die ganze Welt und innerhalb weniger Jahre hatte das Prinzip sich überall durchgesetzt. Für die elektrische Antriebstechnik war damit eine neue Zeit angebrochen.

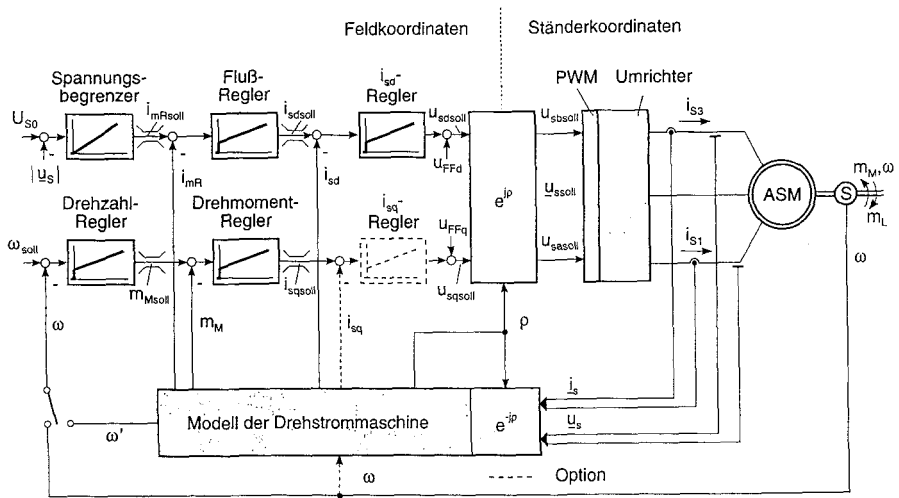


Abb. 9:

Feldorientierte Regelung einer Drehstrommaschine mit mathematischem Maschinenmodell als „Beobachter“

Bild 9 zeigt ein allgemeines Schema des heutigen technischen Standes bei der Regelung einer Drehstrom-Asynchronmaschine. Aus den gemessenen Klemmenströmen (und Spannungen) und evtl. der Drehzahl oder des Drehwinkels werden bei Kenntnis des mathematischen Modells der Maschine alle internen Größen „in Echtzeit“ berechnet, die für die Regelung von Bedeutung sind. Dies ist ein Beispiel, wo sog. „Beobachter“ erstmals unentbehrlicher Bestandteil industriell bedeutender technischer Systeme geworden sind. Für die schnelle Schätzung der nicht meßbaren Variablen in Anwesenheit starker Störungen dienen Methoden der mathematischen Statistik, vor allem Korrelations- und Regressionsverfahren; der Aufwand an Signalverarbeitung ist entsprechend hoch. Da die Zykluszeiten je nach Art und Leistung des Antriebes zwischen $100\ \mu\text{s}$ und $10\ \text{ms}$ liegen, können Signalprozessoren mit vielen MFLOP/s nötig sein. Anfangs hat man aus Gründen der Rechenzeit überwiegend mit sog. Assemblerprogrammierung gearbeitet, heute geht angesichts der immer leistungsfähigeren Mikrorechner die Tendenz zum Einsatz von Hochsprachen, etwa C.

Das in Bild 10 wiedergegebene Oszillogramm des Reversiervorganges einer $22\ \text{kW}$ Asynchronmaschine mit zusätzlichem Last-Trägheitsmoment zeigt den schnellen Anstieg des Drehmomentimpulses bei konstantem Fluß und damit die ausgezeichnete Dynamik des Antriebes; es läßt auch die Wirkung der als Schutz notwendigen Strom- und Drehmoment-Begrenzung sowie die Umkehrung der Phasenfolge der Ständerströme bei geänderter Drehrichtung erkennen.

Das sehr schnell, nach herkömmlichen Maßstäben fast momentan steuerbare Drehmoment ($< 1\ \text{ms}$ bei Stellantrieben, $< 10\ \text{ms}$ bei Großantrieben) ist eine ausgezeichnete Basis für alle übergeordneten Regelungen (Drehzahl oder Drehzahlverhältnisse, absolu-

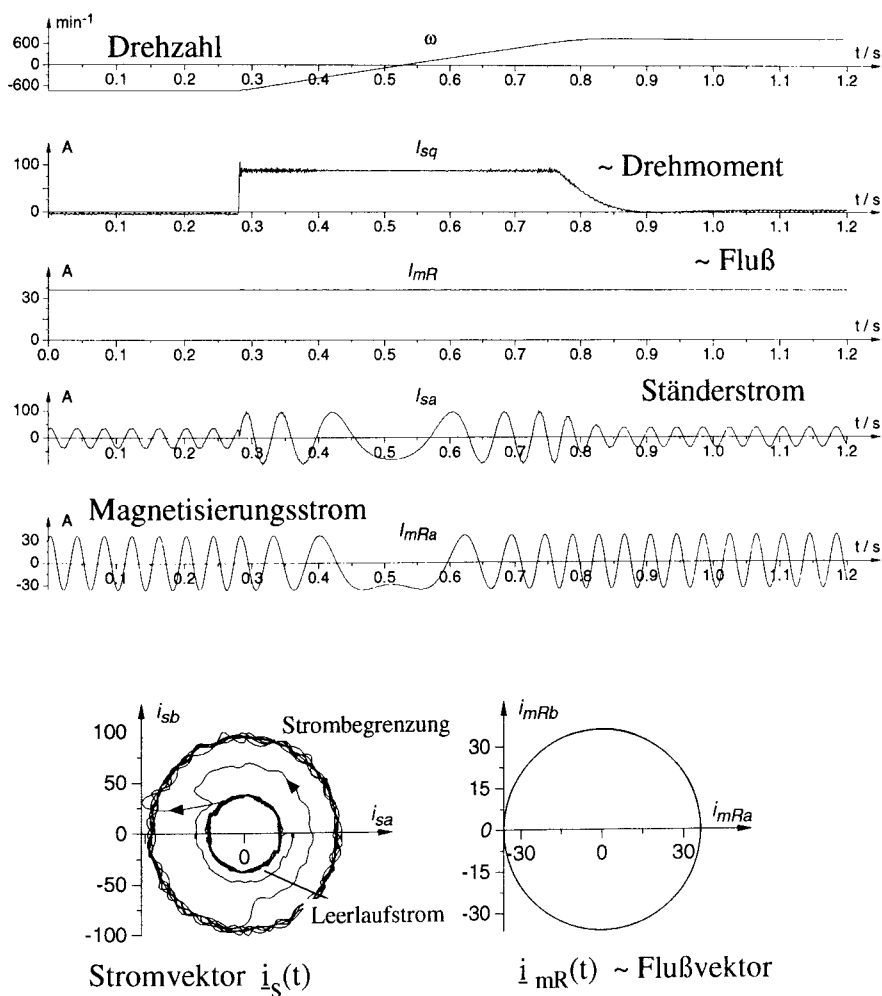


Abb. 10:

Reversiervorgang eines umrichtergespeisten 22 kW Asynchronmotors mit Regelung in Feldkoordinaten

te oder relative Drehwinkel, usw.). Drehstrom-Regelantriebe sind damit zu universell einsetzbaren mechanischen Energiequellen geworden, wie man sie z.B. in der „Mechatronik“ für den Ersatz mechanischer Übertragungen braucht. Im Gegensatz zu früheren Maschinenkonstruktionen mit vielen Getrieben, Gelenkwellen usw. wird nun die mechanische Leistung genau an der Stelle und in der Form gebildet, wo und wie die Last sie benötigt.

Ausblick

Wie schon erwähnt, hatten diese Entwicklungen auch an Hochschulen Auswirkungen, wo das klassische Gebiet elektrischer Maschinen jahrzehntelang im Schatten neuer und aktueller Disziplinen gestanden hatte und nur wenige Studenten sich dafür interessierten; manchmal trug wohl auch die Art der Lehre dazu bei, ihnen den Spaß zu nehmen. In Amerika haben viele Hochschulen das Gebiet der elektromechanischen Energie-wandlung vollständig aufgegeben, mit entsprechenden Auswirkungen auf industrielle Arbeitsplätze.

Dank der Leistungselektronik und Mikroelektronik, damit einhergehend der Lockerung der Bindung an das stationäre 50 Hz Schema und der nun möglichen Hinwendung zu quasi-momentan wirkenden komplexen Steuerungssystemen mit den zugehörigen dynamischen Vorgängen war für diesen Bereich der elektrischen Energietechnik ein hochaktueller Neuanfang möglich.

Wenn wir künftig, etwa während einer Wanderung in den Bergen, die Wahl haben, über unser vernetztes Mobil-Multimedia-Equipment interaktiv eine Partie Fernschach zu spielen, mit dem Börsenmakler eine neue Strategie auszuhecken oder auch nur virtuell am Sylter Strandleben teilzuhaben, werden wir uns vielleicht fragen, ob der schon vor Jahren ausgerufene Kommunikationsnotstand wirklich so bedrängend ist, wie man ihn uns geschildert hat; es könnte ja durchaus sein, daß der Bedarf bei vielen begrenzt ist und sie zeitweilig ihre Ruhe haben wollen. Vielleicht wird nach einer solchen Periode der allgegenwärtigen Kommunikations-Euphorie die Energietechnik, die das Leben erleichtert und uns sogar erlaubt, „in persona“ an entferntem Geschehen teilzunehmen, bei den Menschen die Wertschätzung wiederfinden, die sie zeitweilig verloren hatte.